

平成30年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13874

研究課題名(和文) 外熱式ダイヤモンドアンビルによる地球内部の超臨界流体の弾性波速度測定法の開発

研究課題名(英文) Development of the technique for the measurements of elastic wave velocity in supercritical fluids using externally-heated diamond-anvil cell

研究代表者

三部 賢治 (Mibe, Kenji)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：10372426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球内部におけるマグマや水の分布を理解するため、高温高压下で流体100%サンプルの弾性波速度を測定する手法の開発を行った。実験には、外熱式ダイヤモンドアンビルセル装置、川井型マルチアンビル装置、パリ・エジンバラ型装置を用いた。弾性波の測定は、圧電素子を使用する超音波法により行った。それぞれ3タイプの装置の特長を活かした測定環境が整いつつある。なかでもパリ・エジンバラ型高温高压発生装置を用いた実験においては、炭酸塩マグマの弾性波速度を高温高压下で決定することに成功した。この成果は、大陸下や海洋下のマントルに存在する可能性が指摘されている地震波低速度層の成因を理解する上で重要な基礎的データとなる。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the velocity of seismic waves in the Earth's interior, the experimental methods for the determination of elastic wave velocities in 100% fluid samples were newly developed. Three types of high-pressure and high-temperature apparatus, externally-heated diamond-anvil cell, Kawai-type multi-anvil, and Paris-Edinburgh cell, was used. The ultrasonic wave signals were generated using LiNbO3 transducer, and were used to determine the travel time through the molten samples. Using those techniques, the P-wave velocities in carbonate melts were successfully determined under high-pressure and high-temperature conditions. The obtained data will be useful in understanding the origin of the low-velocity zone which is often observed in Earth's upper mantle. Using the techniques developed in this study, it is expected that the relationship between the elastic wave velocity and the properties of fluids would be clarified in the near future.

研究分野：地球惑星内部物質科学

キーワード：高温高压 弾性波速度 地震波速度 P波速度 マグマ メルト 超臨界流体 炭酸塩

1. 研究開始当初の背景

日本列島などのプレートが沈み込む領域では、沈み込む海洋地殻から放出される H_2O を主成分とする超臨界流体が、マグマの生成や地震の発生に重要な役割を担っていると考えられている (Tatsumi & Eggins, 1995). 実際に地震波による観測からは、島弧下のマントルウェッジには含水鉱物の一種であるサーペンティンが存在すること (Kamiya & Kobayashi, 2000), そしてその様な H_2O は海洋プレートによってさらに地球深部へと運ばれていること (Kawakatsu & Watada, 2007) などが示されている。

地球内部の高温高压下では、水は純粋な H_2O として存在することは不可能であり、温度圧力や周囲の岩石相に応じてケイ酸塩成分を溶解した超臨界流体として存在する (例えば Mibe et al., 2007; Mibe et al., 2011). 一方、より高温の条件下においては、 H_2O はマグマ中に溶解し、含水マグマとして存在する。これまで部分融解サンプル等についての弾性波速度測定実験は行われてきたが (例えば Murase & Kushiro, 1979), 流体やマグマ自体の弾性波速度については、実験的にも理論的にも決められた研究は全く無い。そのため、現状では地震波速度データから沈み込み帯の深部で実際に何が起きているのかを定量的に解釈することは、事実上不可能である。そこで、実際の沈み込み帯深部の温度圧力に相当する条件下で、水を主成分とする超臨界流体の弾性波速度を決定する必要がある。

2. 研究の目的

これまでの高温高压下での弾性波速度測定実験では、主に川井型マルチアンビル高温高压発生装置 (例えば Irifune et al., 2008) やパリ・エジンバラ型の高温高压発生装置 (Kono et al., 2012) など、弾性波信号の伝達媒体 (以下バッファロードと呼ぶ) として酸化アルミニウムや酸化マグネシウム等の多結晶セラミクスを用いての測定が行われてきた。この場合、測定対象となるサンプルは主にマントル主要構成鉱物である固体結晶やコアの研究を目的とした鉄を主成分とする金属メルト等、多結晶セラミクスパーツとの反応性の低い物質のみに限定されてきた。今回測定対象とする水を主成分とする超臨界流体やマグマの場合、高温高压下では多結晶セラミクスパーツと容易に反応が起こり、弾性波速度測定中に流体は完全にサンプル質から流失してしまい、測定できないからである。

そこで、本研究では超臨界流体との反応性が低いという特長をもつダイヤモンド等の材質からなるバッファロード用い、流体 100% の (つまり部分融解ではない) サンプルの弾性波速度を高温高压下で決定することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では前述の通り、比較的低温の高压下で、揮発性物質を含む系での弾性波速度測定実験を行う手法開発を目的としている。そのため以下の 3 つの方法での研究を同時進行で行った。

(1) 外熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた実験

外熱式ダイヤモンドアンビルセルのダイヤモンド製アンビルの背後に $LiNbO_3$ 製のトランスデューサーを取り付ける。任意波形発生装置から出力した正弦波電気信号を $LiNbO_3$ 製トランスデューサーに送り込み、ここでメカニカルな弾性波に変換される。弾性波はダイヤモンドアンビルセル内の高温高压状態のサンプルを通過し、反対側のダイヤモンド面を反射して元の $LiNbO_3$ 製トランスデューサーで再び電気信号に戻される。この電気信号をオシロスコープで観察し、得られた波形からサンプル中を通過する弾性波のトラベルタイムを決定する。

サンプルは 1 対のダイヤモンドアンビルと、その間にはさみこむ貴金属製のガスケットにより封入される。貴金属製のガスケットの中心には円柱形の穴が開けてあり、この円柱形の空間に流体サンプルが満たされる。サンプルの長は実験後に回収したガスケットの厚さを測定することにより決定する。この方法は精度は悪いが、およそそのデータを取るために簡易的に行うことができる方法である。得られたサンプル長とトラベルタイムから、サンプル中を通過する弾性波速度を決定する。

(2) パリ・エジンバラ型高温高压発生装置を用いた実験

ダイヤモンドアンビルセルを用いた実験から得られたデータの妥当性をチェックするため、高温高压下でのマグマの弾性波速度のリファレンスデータを別の方法で決めておくことが望ましい。そのため、パリ・エジンバラ型高温高压発生装置を用いて液体サンプルの弾性波速度測定を行った。実験は放射光施設を用いて行われ、高温高压状態のサンプル長を X 線ラジオグラフィ法により決定した。メルトサンプルと反応性の低いバッファロードを使用し、その他 $LiNbO_3$ を用いる等の部分は上記ダイヤモンドアンビルセルでの実験と同様の信号取得方法により、トラベルタイムを決定した。サンプルとしては、外熱式ダイヤモンドアンビルセル装置の上限温度内でデータを取るという制約を満たすため、比較的融点物質である炭酸塩マグマをサンプルとして用いた。

(3) 川井型マルチアンビル高温高压発生装置を用いた実験

外熱式ダイヤモンドアンビルセルでの実験では、将来的により低温での揮発性物質を含

む系での実験を行う予定である。そのため、高圧で低温の実験を、放射光施設に行かずに自分の実験室でテストを行うため、地震研究所に設置されている川井型マルチアンビル高温高圧発生装置を用いた弾性波速度測定環境を整える。サンプル部分の材質や計測に関する内容は、LiNbO₃製トランスデューサーの設置法が多少異なることを除いては、上記(1)(2)の実験方法とほぼ同じである。ただし、この手法では高温高圧下でのサンプル長が正確には決められないため、弾性波速度の絶対値自体は決まらない。その代わりに、この実験ではP波とS波の比(V_p/V_s)等、サンプル長をキャンセルアウトして得られる物性値を決定することを目的としている。サンプルはサーペンティンを用いた。

4. 研究成果

同時進行で行った3つの研究の結果は以下の通りである。

(1) 外熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いた実験

弾性波を電気信号としてやりとりすることのできるLiNbO₃製のトランスデューサーとその固定用接着材は、熱に弱い。外熱式ダイヤモンドアンビルセルに使用するダイヤモンドは実験中にかなりの高温になるため、ダイヤモンドの背後に直接LiNbO₃製のトランスデューサーを貼ることはできない。そのため、断熱機構を適切に工夫してLiNbO₃製のトランスデューサーを設置し、より良い信号を得る試験を行った。現在までにまだ完全に手法が確立してはいない。この努力は今後も引き続き行い、最適な手法を確立した上でデータを取っていききたい。

(2) パリ・エジンバラ型高温高圧発生装置高温高圧下において低融点である炭酸塩マグマの弾性波速度の測定に成功した(図)。現在までに、メルト100%サンプルのマグマの高温高圧下での測定例は無い。

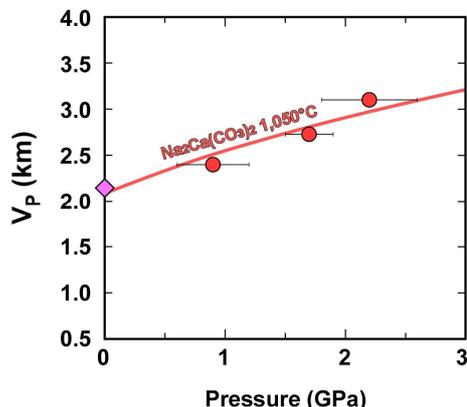


図. 約 1~2GPa, 1050 °Cでの炭酸塩マグマの弾性波速度の圧力変化。

図の通り、圧力の増加にともない、 V_p の増加が観測された。化学組成の変化にともない、炭酸塩マグマの弾性波速度が変化することも確認された。また、温度増加にともない、 V_p は低下する。これらのデータは、パーチの法則として知られている経験則と調和的である。

今回得られた炭酸塩マグマの速度データと、実際の地球の大陸下や海洋下のマントル中に観測される低速度層データを比較することにより、マントルのある深度には炭酸塩マグマがひろく存在する可能性が示唆される。この結果は、ボツワナ共和国で開催された国際キンバーライト会議で発表された(学会発表)。

(3) 川井型マルチアンビル高温高圧発生装置を用いた実験

この実験では、サーペンティンを圧力一定のもと、加熱しながら弾性波のトラベルタイムを測定した。温度上昇にともない、 V_p 及び V_s が徐々に低下するのが観察された。そしてサーペンティンが脱水分解反応が起こる温度に達すると、 V_p , V_s ともに大きく速度低下することが確認された。温度上昇にともない、 V_p の低下する割合(dV_p/dT)と V_s の低下する割合(dV_s/dT)には違いが見られるため、脱水分解反応によりポアソン比が変化することが確認された。今後この実験は様々な物質でデータを得ていくことが可能な環境が整えられた。

<引用文献>

Tatsumi, Y. and S. Eggins, Subduction zone magmatism, Wiley, 1995

Kamiya, S. and Y. Kobayashi, Seismological evidence for the existence of serpentized wedge mantle, *Gephys. Res. Lett.*, 27, 819-822, 2000

Kawakatsu, H. and S. Watada, Seismic evidence for deep-water transportation in the mantle, *Science*, 316, 1468-1471, 2007

Mibe K., M. Kanzaki, T. Kawamoto, K. N. Matsukage, Y. Fei, and S. Ono, Second critical endpoint in the peridotite-H₂O system, *J. Geophys. Res.*, 112, B03201, doi:10.1029/2005JB004125, 2007

Mibe K., T. Kawamoto, K. N. Matsukage, Y. Fei, and S. Ono, Slab melting versus slab dehydration in subduction-zone magmatism, *PNAS*, 108 (20) 8177-8182, 2012

Murase, T., and I. Kushiro, Compressional wave velocity in partially molten peridotite at high pressures, *Year Book Carnegie Inst. Washington*, 78,

559-562, 1979

Irifune, T., Y. Higo, T. Inoue, Y. Kono, H. Ohfuji and K. Funakoshi, Sound velocities of majorite garnet and the composition of the mantle transition region, *Nature* 451, 814-817, 2008

Kono, Y., C. Park, T. Sakamaki, C. Kenny-Benson, G. Shen, Y. Wang, Simultaneous structure and elastic wave velocity measurement of SiO₂ glass at high pressures and high temperatures in a Paris-Edinburgh cell, *Rev Sci Instrum.*, 83(3):033905. doi: 10.1063/1.3698000, 2012

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 1件)

Mibe, K., and Y. Kono, Sound velocity of carbonate melts under high pressure and temperature conditions and the origin of mid-lithosphere discontinuity, 11th International Kimberlite Conference, 2017 (査読有り)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三部 賢治 (MIBE, Kenji)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 10372426

(4) 研究協力者

河野 義生 (KONO, Yoshio)